

УДК 621.923

**С. О. ДИТИНЕНКО, А. Г. КРЮК, Ф. В. НОВИКОВ****ОБГРУНТУВАННЯ УМОВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ, ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПРИ АЛМАЗНОМУ ШЛІФУВАННІ**

Розроблено математичні моделі визначення продуктивності обробки, пружних переміщень, що виникають в технологічній системі, та шорсткості поверхні при круглому зовнішньому поздовжньому шліфуванні алмазними кругами на металевих зв'язках твердосплавних виробів. Показано, що домогтися істотного зменшення шорсткості поверхні при шліфуванні можна створенням на алмазному крузі плосковершинних зерен. Це дозволяє виключити з технологічного процесу операцію притирання алмазними пастами і скоротити час обробки. На цій основі розроблено і впроваджено у виробництво ефективну технологію шліфування алмазними кругами на металевих зв'язках з плосковершинними зернами твердосплавних виробів, що забезпечує високі показники продуктивності обробки, точності та шорсткості оброблених поверхонь.

**Ключові слова:** технологічний процес, операція шліфування, алмазний круг, шорсткість поверхні, продуктивність обробки, пружні переміщення, технологічна собівартість обробки.

**С. А. ДИТИНЕНКО, А. Г. КРЮК, Ф. В. НОВИКОВ****ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ, ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ**

Разработаны математические модели определения производительности обработки, упругих перемещений, возникающих в технологической системе, и шероховатости поверхности при круглом наружном продольном шлифовании алмазными кругами на металлических связках твердосплавных изделий. Показано, что добиться существенного уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании можно созданием на алмазном круге плосковершинных зерен. Это позволяет исключить из технологического процесса операцию притирки алмазными пастами и сократить время обработки. На этой основе разработана и внедрена в производство эффективная технология шлифования алмазными кругами на металлических связках с плосковершинными зернами твердосплавных изделий, обеспечивающая высокие показатели производительности обработки, точности и шероховатости обработанных поверхностей.

**Ключевые слова:** технологический процесс, операция шлифования, алмазный круг, шероховатость поверхности, производительность обработки, упругие перемещения, технологическая себестоимость обработки.

**S. A. DITINENKO, A. G. KRYUK, F. V. NOVIKOV****JUSTIFICATION OF CONDITIONS FOR INCREASING PRODUCTIVITY, ACCURACY AND QUALITY OF PROCESSING DURING DIAMOND GRINDING**

Mathematical models have been developed for determining the productivity of processing, the elastic displacements arising in the technological system, and the surface roughness during round external longitudinal grinding with diamond circles on metal sheaves of hard-alloy products. The classification of various grinding patterns by the periphery of the circle was made according to the kinematic feature of the time of formation of the established surface roughness, taking into account the influence of the different height of grains, the probabilistic nature of their participation in cutting and the presence of areas on the tops of the grains. It is shown that a significant reduction in surface roughness during grinding can be achieved by creating flat-topped grains on the diamond wheel. This allows you to exclude the operation of grinding with diamond pastes from the process and reduce processing time. On this basis, an effective technology of grinding with diamond circles on metal bundles with flat-topped grains of carbide products, which provides high rates of processing performance, accuracy and roughness of the processed surfaces, has been developed and introduced into production.

**Keywords:** технологічний процес, операція шліфування, алмазний коло, шорсткість поверхні, продуктивність обробки, пружні переміщення, технологічна собівартість обробки.

**Вступ.** Застосування традиційних технологій обробки виробів з твердих сплавів циліндричної форми (вставки, інструменти для обробки матеріалів тиском і різанням та ін.), що включають операції шліфування абразивними кругами і притирання алмазними пастами, характеризується високою трудомісткістю. Особливо це відноситься до операцій притирання. Тому для зниження трудомісткості притирання, а в кращому випадку – виключення її з технологічних процесів обробки необхідно удосконалювати операції шліфування. При цьому необхідні показники якості обробки повинні забезпечуватись на операціях шліфування. Перспективним напрямом є застосування технологій шліфування алмазними кругами на металевих зв'язках, що дозволяють підвищити продуктивність і знизити технологічну собівартість обробки. Але, як відомо, ці технології не забезпечують високих показників шорсткості і точності обробки, особливо на операціях

круглого зовнішнього шліфування у зв'язку з відносно низькою жорсткістю технологічної системи. Це вимагає розробки нових більш ефективних технологій шліфування алмазними кругами на металевих зв'язках, у тому числі із застосуванням електроерозійної правки, що дозволяють поряд з підвищенням продуктивності та зниженням технологічної собівартості обробки поліпшити шорсткість і точність оброблюваних поверхонь до рівня показників притирання вільним абразивом (алмазними пастами).

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В роботах [1; 2] виявлено основний недолік діючих технологічних процесів абразивної обробки, які містять надзвичайно високу за трудомісткістю операцію притирання в зв'язку з високими вимогами до шорсткості і точності обробки. Виходячи з цього зроблено висновок про можливість підвищення ефективності технологічного процесу шляхом удосконалення операції круглого зовнішнього шліфування – поліпшення шорсткості та точності

© С. О. Дитиненко, А. Г. Крюк, Ф. В. Новіков, 2018

обробки до необхідного рівня без зниження показників продуктивності і технологічної собівартості обробки.

Але вирішити дану задачу, використовуючи відомі рекомендації з абразивного та алмазного шліфування, не вдалося [3]. Це вимагає проведення комплексу теоретичних, а також експериментальних досліджень, оптимізації структури і параметрів операції круглого зовнішнього шліфування та вибору оптимального варіанта технологічного процесу фінішної обробки циліндричних поверхонь твердосплавних виробів. Як критерії оптимізації слід прийняти продуктивність і технологічну собівартість обробки, як обмеження – точність та шорсткість оброблюваних поверхонь, а в якості змінних параметрів – параметри операції шліфування алмазним кругом на металевій зв'язці і параметри пружної системи круглошліфувального верстата.

**Мета роботи** – підвищення ефективності технологічного процесу фінішної обробки циліндричних поверхонь твердосплавних виробів на основі оптимізації структури і параметрів операції круглого зовнішнього поздовжнього шліфування алмазним кругом на металевій зв'язці з плосковершинними зернами.

Основний матеріал. В зв'язку з виникненням у технологічній системі пружного переміщення  $\delta$ , фактична продуктивність обробки  $Q_{\phi} = Q_{ном} \cdot (1 - \delta / \Pi)$  завжди менша номінальної продуктивності  $Q_{ном}$  на величину  $\delta / \Pi$ , де

$$\delta = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}; \Pi - \text{припуск, що знімається, м; } c -$$

приведена жорсткість технологічної системи в радіальному напрямку, Н/м;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коефіцієнт шліфування;  $P_y$ ,  $P_z$  – відповідно радіальна і тангенціальна складові сили різання, Н;  $\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  – швидкість круга, м/с.

Зменшення  $\delta$  (визначаючого точність розміру обробки) вимагає зменшення номінальної та фактичної продуктивності обробки. Але це не ефективно, як показує практика, ефективніше операцію круглого зовнішнього шліфування виконати в два переходи: чорнове шліфування і виходжування [4]. Тоді середня фактична продуктивність операції шліфування  $Q_{ср}$  визначиться:  $Q_{ср} = Q_{ном} / (1 + \tau_2 / \tau_1)$ , де  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – тривалість переходів чорнового шліфування і виходжування, с;  $\tau_1 = \Pi / S_{ноп}$ ;  $S_{ноп}$  – поперечна подача, м/хід.

Тривалість  $\tau_2$  визначається з диференціального рівняння інтенсивності знімання матеріалу з урахуванням пружних переміщень у технологічній системі:

$$\frac{dv}{d\tau} + A \cdot v = B, \quad (1)$$

$$\text{де } A = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F}; B = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi_1}{\sigma};$$

$v$  – об'єм знятого матеріалу, м<sup>3</sup>;

$\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  – припуски, що видаляються на переходах

чорнового шліфування і виходжування, м;

$F$  – площа оброблюваної поверхні, м<sup>2</sup>.

З урахуванням початкової умови  $\delta / \tau=0 = \Pi_2$  рішення рівняння (1) має вигляд:

$$Q_{\phi} = Q_{\phi_2} \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \tau}{\sigma \cdot F}}; \delta = \Pi_2 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \tau}{\sigma \cdot F}};$$

$$Q_{\phi_2} = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi_2}{\sigma}. \quad (2)$$

**Основний час операції шліфування:**

$$(\tau_1 + \tau_2) = \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_1 \cdot \Phi, \quad (3)$$

де  $\Phi = \left[ \frac{1}{k_2} + z \cdot \ln \left( \frac{k_2}{k_0} \right) \right]$  – безрозмірна функція;

$$z = \left( \frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_2 / \left( \frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_1 - \text{безрозмірний коефіцієнт,}$$

$z \geq 1$ ; індекси 1 і 2 відповідають переходам чорнового шліфування і виходжування;

$$k_2 = \Pi_2 / \Pi; k_0 = \delta_0 / \Pi;$$

$\delta_0$  – точність розміру обробки, м.

Випадок 1 ( $z = 1$ ). З рис. 1,а видно, що найменше значення безрозмірної функції  $\Phi$  (яка визначає основний час операції шліфування) досягається за умови  $\tau_1 = 0$ , тобто оптимальна за структурою операція шліфування включає лише перехід виходжування (і звичайно, нетривалий перехід створення початкового натягу в технологічній системі).

Випадок 2 ( $z > 1$ ). За умови  $z > 1$  безрозмірна функція  $\Phi$  зі збільшенням коефіцієнта  $k_2$  змінюється за екстремальною залежністю, проходячи точку мінімуму (рис. 1,а). Зі збільшенням  $z$  екстремальні значення функції  $\Phi$  збільшуються і зміщуються в область менших значень  $k_2$ . Це вказує на значний вплив коефіцієнта  $z$  (визначаючого ріжучу здатність круга) на структуру операції шліфування. Чим вище ріжуча здатність круга, тим ефективніше більшу частину припуску знімати на переході виходжування. При шліфуванні кругом з відносно низькою ріжучою здатністю, практично весь припуск необхідно знімати на переході чорнового шліфування і лише незначну його частину – на переході виходжування. Теоретичні результати підтверджуються експериментально (рис. 1,б). При шліфуванні алмазним кругом на металевій зв'язці М1-10 після його електроерозійної правки (крива 1) час  $(\tau_1 + \tau_2)$  зі збільшенням припуску

$\Pi_2$  безупинно зменшується, що відповідає кривій  $z = 1$  на рис. 1,а. При шліфуванні приробленим алмазним кругом залежність  $(\tau_1 + \tau_2) - \Pi_2$  трансформується в екстремальну, що відповідає кривим для  $z > 1$  на рис. 1,а. При шліфуванні алмазним кругом після його електроерозійної правки і створення площадок на вершинах зерен (шляхом шліфування алмазним кругом алмазного правлячого олівця) залежність  $(\tau_1 + \tau_2) - \Pi_2$  реалізується лише для невеликих

значень  $\Pi_2$ . У результаті основна частина припуску видаляється на переході чорнового шліфування

На цій основі розроблено нові інженерні методики розрахунку оптимальних параметрів операції круглого зовнішнього поздовжнього алмазного шліфування: тривалості операції і її переходів; величин припусків, що видаляються на кожному переході в залежності від вимог по точності обробки (обумовлені величиною пружного переміщення в технологічній системі) і ріжучою здатністю алмазного круга.

Обґрунтовано основні умови зменшення тривалості оптимальної за структурою операції шліфування, що включає лише перехід виходжування:

$$\tau = \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot \frac{\sigma}{K_{ш}} \cdot \ln \frac{\Pi}{\delta_0}, \quad (4)$$

$$\text{де } \frac{\sigma}{K_{ш}} = \frac{\pi \cdot tg \gamma \cdot HV}{2 \cdot (1 - \eta)};$$

$$\eta = \frac{x}{(x + H_{max})};$$

$HV$  – твердість оброблюваного матеріалу (за Віккерсом), Н/м<sup>2</sup>;

$\gamma$  – половина кута при вершині зерна, робоча частина якого представлена у формі усіченого конуса;

$\eta$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує ступінь затуплення зерен, змінюється в межах 0...1;

$x$  – умовна величина лінійного зносу зерна, м;

$H_{max}$  – максимальна товщина зрізу, м.

На основі розробленої аналітичної моделі шорсткості циліндричної поверхні при круглому зовнішньому поздовжньому шліфуванні обґрунтовано умови істотного зменшення параметра шорсткості

$R_{max}$ :

$$\left[ \left( R_{max} + \frac{3 \cdot x}{4} \right)^2 - \frac{x^2}{16} \right] \sqrt{R_{max}} = \frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{6 \cdot tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \sqrt{\frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{D_{дет}}} \quad (5)$$

$$R_{max}^{1.5} \cdot (R_{max} + x) = \frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{6 \cdot tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{D_{дет}}} \quad (6)$$

де  $\bar{X}$  – зернистість круга, м;

$m$  – об'ємна концентрація зерен круга;

$V_{дет}$  – швидкість деталі, м/с;

$D_{кр}$ ,  $D_{дет}$  – відповідно діаметри круга і деталі, м.

Рівняння (5) отримано з урахуванням, а рівняння (6) – без урахування утворення площадок зносу на вершинах зерен алмазного круга. За умови  $x=0$  рівняння (5) і (6) приймають вигляд залежності:

$$R_{max} = \bar{R}_{max} = \left( \frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{6 \cdot tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{D_{дет}}} \right)^{0.4} \quad (7)$$

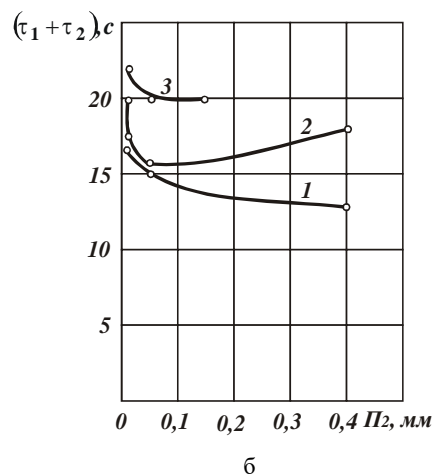
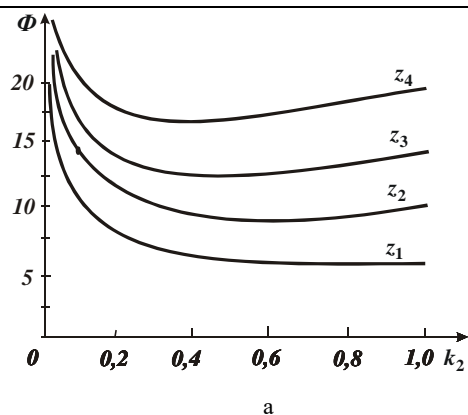


Рис. 1 – Залежність  $\Phi$  від  $k_2$ : а – ( $z_1=1$ ;  $z_2=2$ ;  $z_3=3$ ;  $z_4=4$ ); б – залежність основного часу операції шліфування  $\tau_1 + \tau_2$  від припуску  $\Pi_2$  при обробці: 1 – алмазним кругом (1A1 300x25x5 AC6 125/100 M1-10 4) після його електроерозійної правки; 2 – приробленим алмазним кругом (після 10 хв роботи); 3 – алмазним кругом із плосковершинними зернами

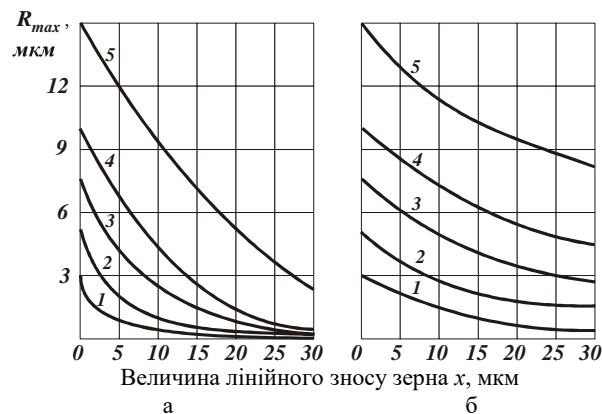


Рис. 2 – Залежності  $R_{max}$  від  $x$ , отримані на основі: а – рівняння (7); б – рівняння (8); 1 –  $\bar{R}_{max} = 3$  мкм; 2 –  $\bar{R}_{max} = 5$  мкм; 3 –  $\bar{R}_{max} = 7,5$  мкм; 4 –  $\bar{R}_{max} = 10$  мкм; 5 –  $\bar{R}_{max} = 15$  мкм

Встановлено, що з усіх параметрів, які входять у рівняння (5) і (6), найбільше впливає на  $R_{max}$  величина  $x$ , особливо у випадку утворення на зернах площадок зносу (рівняння (5), рис. 2,а), тобто при різанні плосковершинними зернами. Зі збільшенням величини

х можна істотно зменшити параметр  $R_{max}$ . Виконані експериментальні дослідження підтвердили теоретичні результати.

Встановлено, що при шліфуванні алмазним кругом на металевій зв'язці 1A1 300x20x5 AC6 125/100 M1-10 4 із плосковершинними зернами параметр шорсткості  $R_a$  ( $R_a \approx 0,2 \cdot R_{max}$ ) зменшився з 2,2 до 0,1 мкм (крива 2, рис. 3). При цьому зміна режимів шліфування, а також обробка кругом, який працював уже деякий час після електроерозійної правки (крива 1, рис. 3), не привели до істотного зменшення шорсткості обробки.

Для створення плосковершинних зерен застосовувалися способи шліфування алмазним кругом полікристалічного синтетичного надтвердого матеріалу і алмазного правлячого олівця.

Експериментально встановлено, що при шліфуванні алмазним кругом на металевій зв'язці з плосковершинними зернами з часом спостерігається деяке збільшення параметра шорсткості  $R_a$  (крива 2, рис. 3) внаслідок підключення в різання нових більш гострих зерен. Особливо це виявляється при шліфуванні алмазним кругом на металевій зв'язці M1 – 01. Застосування більш зносостійкого алмазного круга на металевій зв'язці M1-10 дозволило усунути даний недолік – шорсткість обробки практично стабілізувалася в часі на рівні  $R_a = 0,1-0,2$  мкм при зміні глибини шліфування в межах 0,01 – 0,025 мм.

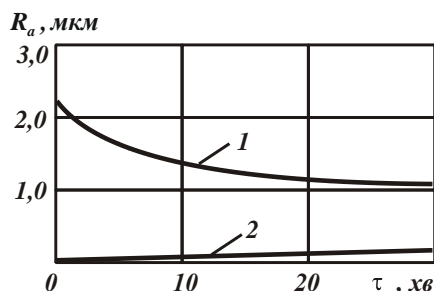


Рис. 3 – Залежність параметра шорсткості обробки  $R_a$  від часу шліфування  $\tau$ : 1 – після електроерозійної правки круга; 2 – після створення площадок на вершинах зерен круга

Зроблено оцінку вірогідності розрахунку шорсткості циліндричних поверхонь при шліфуванні алмазним кругом з гостровершинними і плосковершинними зернами. Для цього спочатку була отримана спрощена аналітична залежність (7) для визначення параметра  $R_{max}$ , що враховує умовне одновисотне виступання зерен, потім – уточнені залежності, що враховують різновисотне виступання зерен над рівнем зв'язки та ймовірнісний характер участі зерен у різанні [5]. Встановлено, що у всіх трьох випадках приходимо до однієї і тієї ж залежності (7), відмінність полягає лише в числових коефіцієнтах. Так, розраховане за залежністю (7) значення  $R_a = 0,2 \cdot R_{max}$  для вихідних даних:  $\tan \gamma = 1$ ;  $X = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м;  $m = 100$ ;  $V_{кр} = 30$  м/с;  $V_{дет} = 15$  м/хв;  $D_{кр} = 0,3$  м;  $D_{дет} = 0,014$  м дорівнює  $R_a = 0,86$  мкм,

розраховане з урахуванням різновисотного виступання зерен над рівнем зв'язки дорівнює  $R_a = 1,5$  мкм і розраховане з урахуванням імовірносної участі зерен у різанні дорівнює  $R_a = 2,43$  мкм. Як видно, розрахунок за уточненими залежностями веде до збільшення значень  $R_a$ . У порівнянні з експериментальним значенням  $R_a = 1,9$  мкм (отриманим після електроерозійної правки алмазного круга), урахування різновисотного виступання зерен над рівнем зв'язки дає занижене (у межах 20%), а урахування імовірносного характеру участі зерен у різанні дає завищене (у межах 27%) значення  $R_a$  (стосовно експериментальним даних отриманим при шліфуванні алмазним кругом після його електроерозійної правки). Установлено також збіжність у межах 10 % розрахункових і експериментальних значень шорсткості при шліфуванні алмазним кругом із плосковершинними зернами. Дані результати дозволили вперше кількісно оцінити вплив зазначених вище трьох факторів на умови формування шорсткості циліндричних поверхонь при шліфуванні і наблизити розрахункову схему до реальної.

Виконано класифікацію кінематичних схем шліфування периферією круга за ознакою часу формування сталої шорсткості поверхні. Теоретично показано існування трьох принципових схем, обумовлених кінематикою руху оброблюваної поверхні стосовно робочої поверхні круга (у радіальному, тангенціальному і поздовжньому, з боку торцевої поверхні круга, напрямках), які істотно відрізняються часом формування сталої шорсткості поверхні (рис. 4).

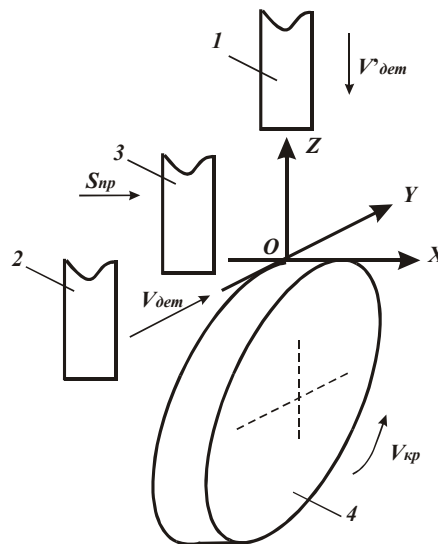


Рис. 4 – Три принципові схеми формування шорсткості поверхні при шліфуванні: 1, 2, 3 – оброблюваного зразка в радіальному, тангенціальному і поздовжньому напрямках; 4 – шліфувальний круг

Встановлено, що найбільшим часом формування шорсткості поверхні при шліфуванні характеризується третя схема, а найменшим – перша. Тому найменша шорсткість поверхні досягається при шліфуванні по третій схемі, а найбільша – при шліфуванні по першій. Друга схема (включає плоске, кругле зовнішнє і

внутрішнє шліфування) займає проміжне положення.

У роботі обґрунтовано вибір оптимального варіанта технологічного процесу фінішної обробки циліндричних поверхонь твердосплавних виробів за критеріями найбільшої продуктивності і найменшої технологічної собівартості обробки з урахуванням обмежень за точністю та шорсткістю оброблюваних поверхонь [6]. Показано, що необхідні значення точності розміру (менше 10 мкм) і шорсткості обробки ( $R_a = 0,1$  мкм) досягаються при значенні безрозмірного коефіцієнта  $\eta = 0,91$ . Таке велике значення безрозмірного коефіцієнта  $\eta$ , що наближається до граничного ( $\eta=1$ ), обумовлено утворенням на вершинах зерен значних площадок – довжиною 30 мкм і більше. Шліфування алмазним кругом після електроерозійної правки забезпечує невеликі значення коефіцієнта ( $\eta \rightarrow 0$ ) у зв'язку з високою гостротою ріжучих зерен круга.

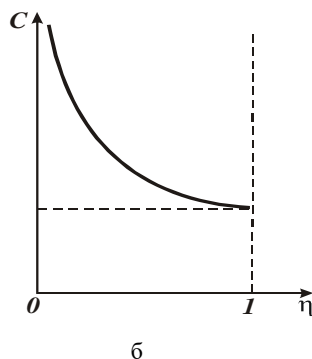
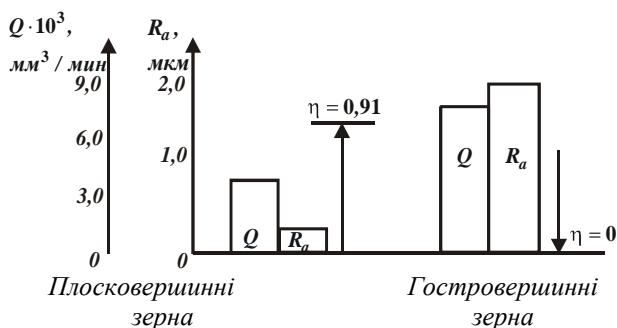


Рис. 5 – Значення продуктивності  $Q$  та шорсткості обробки  $a - R_a$   $a -$  при шліфуванні алмазним кругом на металевій зв'язці (із плосковершинними та гостро-вершинними зернами після електроерозійної правки); б – залежність технологічної собівартості  $C$  від безрозмірного коефіцієнта  $\eta$

Установлено, що збільшення коефіцієнта  $\eta$  від 0 до 0,91 у результаті утворення площадок на вершинах зерен відповідає зменшенню середньої продуктивності операції круглого зовнішнього шліфування тільки в 2 рази (рис. 5, а). При цьому потужність шліфування зросла незначно – усього в 2 рази, тобто алмазний круг на металевій зв'язці з плосковершинними зернами має досить високу ріжучу здатність, дозволяє одночасно забезпечити високопродуктивне знімання оброблюваного матеріалу і зменшити шорсткість  $R_a$

обробки з 2,0 мкм до значень 0,1–0,2 мкм.

Виконано аналіз технологічної собівартості обробки на операції шліфування на основі отриманої аналітичної залежності, що враховує дві статті витрат які змінюються, зв'язані з заробітною платою робітника і витратою алмазних кругів. Теоретично встановлено, що зі збільшенням безрозмірного коефіцієнта  $\eta \rightarrow 1$  технологічна собівартість обробки  $C$  безупинно зменшується (рис. 5,б). Це свідчить про можливість реалізації для встановлених умов шліфування ( $\eta = 0,91$ ) практично мінімального значення  $C$ .

Порівняння трьох варіантів технологічного процесу фінішної обробки циліндричної поверхні спеціального твердосплавного інструменту (двох запропонованих і базового варіанту, наведених у таблиці) показало, що за критерієм найбільшої продуктивності обробки ефективно застосування першого варіанту. Вилучення з технологічного процесу операції притирання алмазною пастою дозволяє також істотно знизити технологічну собівартість обробки. Для реалізації даних умов шліфування розроблено спеціальну технологію підготовки алмазного круга до роботи, що включає балансування круга, його електроерозійну правку для остаточного усунення биття (у межах 10 мкм) і якісного розкриття алмазоносного шару, а потім утворення на вершинах зерен площадок. На цій основі розроблено та впроваджено у виробництво ефективну технологію фінішної обробки циліндричних поверхонь твердосплавних виробів.

Таблиця. Варіанти технологічного процесу обробки циліндричної поверхні твердосплавної розвертки (діаметр – 20 мм, довжина – 30 мм, припуск – 1 мм)

№	Операція шліфування	Операція притирання	Час, хв.
1	Алмазний круг 1А1 300х20х5 АС6 125/100 М1–10 4 із плосковершинними зернами; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 2$ хв.	Немає	2
2	Алмазний круг 1А1 300х20х5 АС6 125/100 М1–10 4 після електроерозійної правки; $R_a = 1,0$ мкм; $\tau = 1$ хв.	Припуск – 0,02 мм; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 4$ хв.	5
3	Алмазний круг 1А1 300х20х5 АС4 100/80 В2–01 4; $R_a = 0,4$ мкм; $\tau = 3$ хв.	Припуск – 0,02 мм; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 4$ хв.	7

**Висновки.** Розроблено аналітичні моделі продуктивності та основного часу операції круглого зовнішнього поздовжнього алмазного шліфування, що включає переходи чорнового шліфування і виходжування, а також розроблено аналітичну модель пружного переміщення, що утворюється на кожному переході операції шліфування. На цій основі

проведено оптимізацію структури і параметрів операції шліфування.

Виконано класифікацію різних схем шліфування периферією круга за кінематичною ознакою часу формування сталої шорсткості поверхні. Розроблено аналітичну модель формування шорсткості поверхні при шліфуванні. Показано можливість істотного зменшення шорсткості за рахунок застосування штучно створених на вершинах зерен алмазного круга на металевій зв'язці значних площадок. Встановлено, що за критеріями найбільшої продуктивності й найменшої технологічної собівартості обробки більш ефективним є варіант технологічного процесу, який включає лише операцію круглого зовнішнього шліфування алмазним кругом на металевій зв'язці з плосковершинними зернами, що забезпечує виконання високих вимог за шорсткістю та точністю обробки.

#### Список литературы

1. Рыжов Э.В., Сагарда А.А., Ильицкий В.Б., Чеповецкий И.Х. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке. К.: Наук. думка, 1979. 244 с.
2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Саратов, 1979. 232 с.
3. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования. Москва: Машиностроение, 1975. 175 с.
4. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. Ленинград: Машиностроение, 1984. 103 с.

5. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки : монография. Днепр : ЛИРА, 2018. 400 с.
6. Дитиненко С.А. Оптимизация круглого наружного продольного шлифования. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, 2005. Вип. 33. С. 225-230.

#### References (transliterated)

1. Ryzhov E. V., Sagarda A. A., Il'itskiy V. B., Chepovetskiy I.KH. Kachestvo poverkhnosti prialmazno-abrazivnoy obrabotke [Surface quality in diamond abrasive machining] Kiyev, Nauk. dumka Publ., 1979. 244 p.
2. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke [Dynamics of shaping surfaces on abrasive machining]. Saratov, 1979. 232 p.
3. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya [Optimization of the grinding process]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975. 175 p.
4. Lur'ye G. B. Progressivnyye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya [Progressive methods for external round grinding]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 103 p.
5. Novikov F. V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki : monografiya [Fundamentals of Mathematical Modeling of Technological Processes of Mechanical Processing: A Monograph]. Dnepr, LIRA Publ., 2018. 400 p.
6. Ditinenko S. A. Optimizatsiya kruglogo naruzhnogo prodol'nogo shlifovaniya [Optimization of the round outer longitudinal grinding]. Visnyk Kharkivs'koho natsional'nogo tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva [Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture], 2005, issue. 33. P. 225–230.

Надійшла (received) 27.09.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Дитиненко Станіслав Олександрович (Дитиненко Станислав Александрович. Ditinenko Stanislav Aleksandrovich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-0678924575; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

**Крюк Анатолій Григорьевич (Крюк Анатолій Григорович, Kryuk Anatoly Grykorievich)** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету, г. Харків. тел.: +38-0665936393; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

**Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedor Vasiliviyth)** – доктор технічних наук, професор кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru